半空间中机载甚低频双拖曳天线电磁辐射特性

吴龙刚 苏东林 陈佳佳 武南开

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 对半空间中机载甚低频双拖曳天线电磁辐射特性进行了研究. 基于有限元算法建立了机载甚低频双拖曳天线半空间全波仿真模型,利用边界条件模拟了海面半空间环境,深入分析了海面半空间环境对于机载甚低频双拖曳天线辐射特性的影响,通过调整机载甚低频双拖曳天线长短比,优化了机载甚低频双拖曳天线的输入阻抗、辐射效率等设计参数,该研究结果与美国海空军发展中心公布的数据吻合较好,验证了研究结论的有效性和可信性,对机载甚低频双拖曳天线的设计及应用具有参考意义.

关 键 词: 半空间; 甚低频; 天线; 电磁辐射特性; 数值仿真

中图分类号: TN 820.2

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)11-1471-04

Analysis of electromagnetic radiation for airborne very-low-frequency (VLF) dual trailing antenna in half-space

Wu Longgang Su Donglin Chen Jiajia Wu Nankai

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Electromagnetic radiation characteristics of an airborne very-low-frequency (VLF) dual trailing antenna in the half-space (a space including air and seawater) were studied. The airborne VLF dual trailing antenna models in half-space were established and calculated by finite element method (FEM). The influences of the half-space to antenna radiation patterns were investigated using numerical results. In addition, through shifting feed locations (i.e., changing the ratio of long antenna and short antenna), variation trends of antenna characteristic parameters in half-space, including antenna input impedance and radiation efficiency were obtained. Good agreements of simulation results and the corresponding data announced by american naval and air development center were achieved, which validates the effectiveness and reliability of the proposed method and results. The achievements provide significance to the airborne VLF dual trailing antenna design in the future.

Key words: half-space; very-low-frequency; antenna; EM radiation; simulation

机载对潜通信系统具备遭受核打击后继续执行对潜通信的能力,是目前美国海军主要的抗毁对潜通信手段. 甚低频双拖曳天线(DTWA, Dual Trailing Wire Antenna)是机载对潜通信系统的关键组成部分,其电磁辐射特性是机载对潜通信系统的重要性能之一.

目前,国外该领域的公开文献较少,文献[1]采用电路分析方法对机载甚低频双拖曳天线的宽带响应进行了分析,但未研究其辐射特性;文献[2]对甚低频双拖曳天线阻抗变换与高功率发射天线耦合能力之间关系进行了研究,给出了一种甚低频双拖曳天线的线性模型,未对辐射性能进行计算;文献[3]基于矩量法和电磁数值计算程序(Mini-NEC)对双拖曳天线传递函数进行了研

收稿日期: 2011-05-26; **网络出版时间**: 2011-11-23 15:07; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111123.1507.013

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111123.1507.013.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60831001)

作者简介: 吴龙刚(1978 -),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士生,alawuwu@163.com.

究,计算了自由空间天线辐射性能. 国内对于机载甚低频双拖曳天线的研究尚处于起步阶段,以理论研究为主,基于矩量法对天线的电磁辐射性能分析取得了一些研究成果. 文献[4]研究了机载甚低频双拖曳天线特点,给出了美国海空军发展中心在 28.5 kHz 和 17 kHz 两个频点上机载双拖曳天线的计算结果,却未给出详细的天线数学模型;文献[5-6]基于矩量法计算了自由空间中机载甚低频双拖曳天线的辐射特性,但未考虑到海面半空间对辐射特性的影响;文献[7]在自由空间中对甚低频机载双拖曳天线线型模型进行了分析. 由于对潜通信飞机通常是在海洋上空执行任务,因此在海面半空间中开展甚低频机载双拖曳天线辐射特性研究更具现实意义.

本文通过边界条件模拟海面半空间环境,采用有限元算法计算了机载甚低频双拖曳天线的电磁辐射特性,该方法对机载甚低频双拖曳天线系统的仿真设计具有参考意义.

1 机载甚低频双拖曳天线基本原理

机载甚低频双拖曳天线由一根短天线(1 000 ~ 2 000 m)和一根长天线(5 000 ~ 7 000 m)共同组成,天线总长度为工作波长的一半,发射机功率为 200 kW,长天线与发射机相连,短天线由飞机尾部甩出,如图 1 所示.

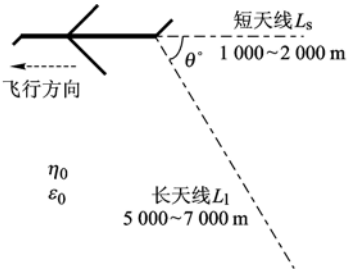

图 1 机载甚低频双拖曳天线示意图

机载甚低频双拖曳天线的长短天线收放长度可调节,属于大纵横比的非对称半波偶极子天线. 除采用匹配网络外,还可以通过调整机载甚低频双拖曳天线长短比的方法来调节天线输入阻抗,从而达到发射机与天线阻抗匹配的目的. 定义机载甚低频双拖曳天线长短比为 D,则

$$D = L_l / L_s \tag{1}$$

其中,L_l 为长天线线长;L_s 为短天线线长.

假设天线馈电点偏离天线中点距离为 z_f,如图 2 示,则输入端的电流为

$$I_A = I_m \sin\left[\beta\left(\frac{L}{2} - |z_f|\right)\right] \tag{2}$$

其中,I_m 为中心点电流;$\beta = 2\pi/\lambda$;L 为天线总长.

图 2 所示的非对称半波振子天线的情况下,$\beta L/2 = \pi/2$,式(2)可简化为

$$I_A = I_m \cos\beta z_f \tag{3}$$

利用式(2)可求得输入电阻 R_A(不包括欧姆损耗)为

$$R_A = \frac{I_m^2}{I_A^2} R_{rm} = \frac{R_{rm}}{\cos^2\beta z_f} \quad \left(L = \frac{\lambda}{2}\right) \tag{4}$$

其中,R_{rm}为中心点馈电电阻.

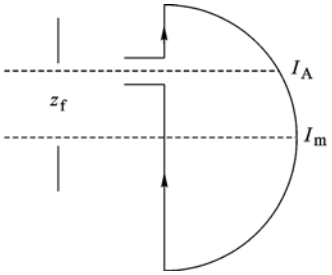

图 2 非中心馈电的半波振子天线

2 海面半空间环境模拟

实际应用中对潜通信飞机通常在海面上空飞行,由于海水与天线末端的电容效应将导致机载甚低频双拖曳天线的输入阻抗、辐射效率、反射系数等参数发生变化. 此外,海水对电磁波的反射和吸收也将导致海面半空间中机载甚低频双拖曳天线的辐射性能较自由空间有所不同. 因此,开展半空间环境下的机载甚低频双拖曳天线辐射特性计算十分必要.

本文基于有限元算法,通过在空气和海水分层介质中设置不同的边界条件实现对海面半空间的模拟. 假设飞机在无风空气中飞行,海面以下为一定深度的海水,机载甚低频双拖曳天线工作波长 $\lambda = 12.876$ km(对应 $f = 23.3$ kHz),空气介质的介电常数为 ε_0、磁导率为 μ_0,海水介质的介电常数为 ε_r、磁导率为 μ_r. 由于海面的粗糙度和波浪高度通常在 10 m 以下,几何尺度仅为工作波长的千分之一,因此建立海面半空间环境模型时,可将粗糙海面视为平稳的光滑海平面,如图 3 所示.

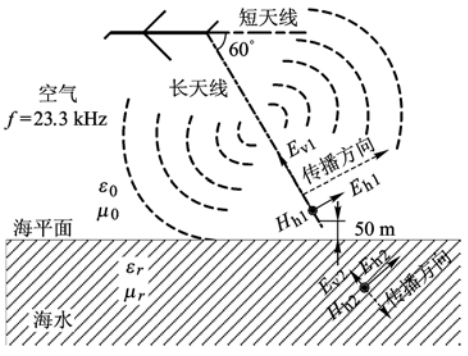

图 3 海面半空间环境模拟示意图

3　机载甚低频双拖曳天线建模仿真

3.1　飞行状态的选取

受空气动力学的影响,实际中机载甚低频双拖曳天线的飞行状态非常复杂,为简化建模过程,本文仅考虑飞机匀速直线飞行状态下机载甚低频双拖曳天线建模问题. 此时机载甚低频双拖曳天线可看成是忽略剪断力影响[6],重点考虑张力作用的稳态模型,长天线呈现斜线状态,短天线呈现水平状态. 为了使天线较好地发射信号,假设长天线的垂直度为 67%,即长天线与水平面的夹角为 60°.

3.2　机载甚低频双拖曳天线建模

本文借鉴文献[8 – 10]提供的模型数据对机载甚低频双拖曳天线建模,天线总长度为6 438 m,中心频率为 23. 3 kHz. 由于天线的纵横比非常大,为克服有限元算法网格剖分困难的问题,采取天线分段建模的方法,网格剖分采用自适应剖分,辅以手动剖分的方式. 长天线与发射机相连,呈斜线状态,安装在机腹处;短天线与机尾相连,呈水平状态. 载机平台建模采用中型运输机数据,机身长度设为 40 m,并对机身结构进行化简,图 4 为机载甚低频双拖曳天线仿真模型.

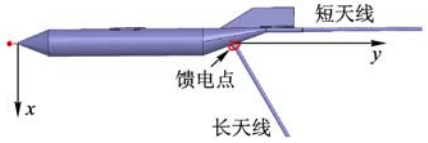

图 4　机载甚低频双拖曳天线模型

3.3　海面半空间中机载甚低频双拖曳天线辐射特性仿真分析

本文采用有限元算法,分别计算了半空间和自由空间下机载甚低频双拖曳天线的输入电阻、损耗阻抗、输入电抗、辐射效率等参数,并与美国海空军发展中心(NADC, Naval and Air Development Center)发布的在 28. 5 kHz 和 17 kHz 两个频率下,双拖曳天线自由空间计算数据[10]对比,如图 5 ~ 图 7,表 1 ~ 表 4 所示. 其中:$Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$ 为机载甚低频双拖曳天线输入阻抗,R_{in} 为输入电阻,X_{in} 为输入电抗,R_L 为损耗电阻,$\eta_0 = R_{in}/(R_{in} + R_L)$ 为辐射效率.

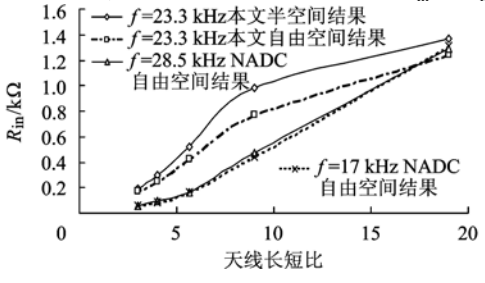

图 5　输入电阻结果对比

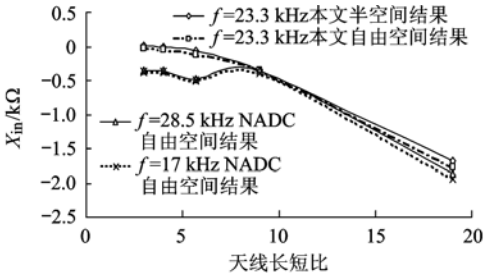

图 6　输入电抗结果对比

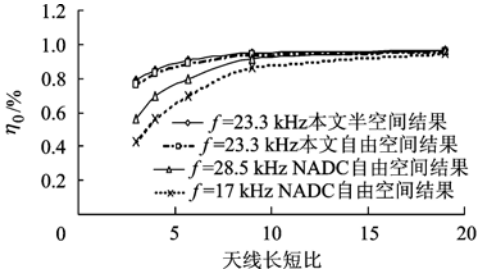

图 7　辐射效率结果对比

表 1　本文海面半空间仿真结果(f = 23. 3 kHz)

长短比	R_{in}/Ω	R_L/Ω	X_{in}/Ω	η_0/%
0. 475λ/0. 025λ	1365. 2	51. 4	– 1 683. 2	96. 4
0. 45λ/0. 05λ	978. 81	51. 4	– 358. 45	95. 0
0. 425λ/0. 075λ	517. 77	51. 4	– 58. 567	91. 0
0. 4λ/0. 1λ	294. 43	51. 4	– 8. 305 3	85. 1
0. 375λ/0. 125λ	191. 19	51. 4	17. 883	78. 8

表 2　本文自由空间仿真结果(f = 23. 3 kHz)

长短比	R_{in}/Ω	R_L/Ω	X_{in}/Ω	η_0/%
0. 475λ/0. 025λ	1 244. 5	51. 4	– 1 776	95. 7
0. 45λ/0. 05λ	768. 07	51. 4	– 359	93. 7
0. 425λ/0. 075λ	424. 33	51. 4	– 121. 7	89. 2
0. 4λ/0. 1λ	254. 67	51. 4	– 50	83. 2
0. 375λ/0. 125λ	169. 77	51. 4	– 23. 2	76. 7

表 3　NADC 发布自由空间计算结果 1(f = 28. 5 kHz)

长短比	R_{in}/Ω	R_L/Ω	X_{in}/Ω	η_0/%
0. 475λ/0. 025λ	1 288. 1	42	– 1 862. 3	96. 8
0. 45λ/0. 05λ	468. 7	42	– 361. 6	91. 8
0. 425λ/0. 075λ	162. 5	42	– 474. 7	79. 5
0. 4λ/0. 1λ	98. 1	42	– 349. 6	70
0. 375λ/0. 125λ	54. 0	42	– 362. 3	56. 25

表 4　NADC 发布自由空间计算结果 2(f = 17 kHz)

长短比	R_{in}/Ω	R_L/Ω	X_{in}/Ω	η_0/%
0. 475λ/0. 025λ	1 308. 7	70. 4	– 1 937	94. 8
0. 45λ/0. 05λ	444. 1	70. 4	– 396. 1	86. 3
0. 425λ/0. 075λ	162. 2	70. 4	– 491. 3	69. 7
0. 4λ/0. 1λ	90. 9	70. 4	– 377. 0	56. 4
0. 375λ/0. 125λ	53. 4	70. 4	– 376. 6	43. 1

4 结 论

本文数值计算结果和 NADC 结果比较可得出以下结论：

1）本文自由空间计算结果与 NADC 公布的自由空间计算结果变化趋势一致，说明本文方法是有效、可信的. 采用此方法对海面半空间中机载甚低频双拖曳天线电磁辐射特性分析结果，对机载甚低频双拖曳天线的设计及应用具有参考意义.

2）本文结果表明在海水半空间中机载甚低频双拖曳天线输入阻抗和天线辐射效率与自由空间相比均增大，但发射机输入效率减小.

3）当调整双拖曳天线的长短比时，天线的输入阻抗、辐射效率等均随之变化，长短比越大，输入阻抗越高，辐射效率也越高. 在天线设计和实际应用中，可以通过调节双拖曳天线长短比达到优化输入阻抗、提高辐射效率的目的.

4）依据本文建立的半空间甚低频双拖曳天线模型，工作频点 $f = 23.3$ kHz，天线长短比在 $0.4\lambda/0.1\lambda$ 和 $0.375\lambda/0.125\lambda$ 之间，存在输入电抗值过零点，天线产生谐振，辐射效果好.

5）本文计算结果比 NADC 公布数据偏大是由于仿真计算的飞行环境、机载平台和天线瞬间状态的差异所致.

参考文献（References）

[1] Marin Lennart, Castillo J PHILIP, Lee KS H. Broad-band analysis of VLF/LF aircraft wire antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1978, 26(1): 141 – 145

[2] El-Arini M B, Mitry Sameh A, Lee Richard. Tacamo antenna analysis for the new high power transmit set(HPTS) [C] //IEEE MILCOM'90. Monterey, CA, USA: IEEE, 1990, 3: 1071 – 1079

[3] Kilgore D R, Mitrym A. Transfer function between airborne VLF transmit and receive loop antenna [C]//IEEE MILCOM'91. McLean, VA, USA: IEEE, 1991, 1: 47 – 55

[4] 胡家艮，蔡樱. 甚低频飞机拖曳天线[J]. 现代通信技术，1999，10(2)：37 – 45
Hu Jiagen, Cai Ying. Very low frequency airborne antenna. modern communication technology [J]. Modern Communications Technology, 1999, 10(2): 37 – 45(in Chinese)

[5] 魏亮，柳超. 机载甚低频双拖曳天线辐射特性的计算[C]//王积鹏. 2007 全国天线年会论文集. 合肥：中国电子科学研究院学报，2007：573 – 576
Wei Liang, Liu Chao. Analysis the impedance of the dual trailing wire antenna(DTWA) on an aircraft[C]//Wang Jipeng. 2007 National Antenna Annual Meeting Collected Papers. Heifei: Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2007: 573 – 576(in Chinese)

[6] 魏亮，柳超. 浅析机载甚低频双拖曳天线的辐射特性[J]. 现代电子技术，2007，20(1)：14 – 16
Wei Liang, Liu Chao. Analysis the impedance of the dual trailing wire antenna(DTWA) on an aircraft[J]. The Modern Electronic Technology, 2007, 20(1): 14 – 16(in Chinese)

[7] 吴笛. 甚低频机载拖曳天线系统线性模型分析[J]. 舰船电子工程，2009，15(3)：68 – 71
Wu Di. Analysis of dual trailing wire antenna's wire model[J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 15(3): 68 – 71(in Chinese)

[8] Severson V L, Enochson G L. Lighting protection testing of the E-6 long trailing wire antenna [C]//IEEE ISEMC1990. Washington, DC, USA: IEEE, 1990: 212 – 217

[9] Hurdsman D E, Hansen P M, Rockway J W. LF and VLF antenna modeling[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 2003. Columbus, USA: IEEE, 2003: 811 – 814

[10] Breakall J K. Computer modeling of antennas using NEC and MININEC[C]//Circuits and Systems1989, Proceedings of the 32nd Midwest Symposium on. Champaign, IL, USA: [s. n.] 1989: 724 – 726

（编 辑：娄 嘉）